

**Б.А.Григорьев
А.А.Герасимов
И.С.Александров**

**Теплофизические свойства
углеводородов нефти,
газовых конденсатов,
природного и сопутствующих
газов**

В двух томах

Том 2



Москва
Издательский дом МЭИ
2019

УДК 665.6:536
ББК 22.317
Г 834



*Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
по проекту № 18-18-00055,
не подлежит продаже*

Рецензенты:

доктор техн. наук, проф. В.В. Сычев (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»);
доктор техн. наук, руководитель ГНМЦ «ССД» Росстандарта
А.Д. Козлов (ВНИИМС)

Григорьев Б.А.

Г 834 Теплофизические свойства углеводородов нефти, газовых конденсатов, природного и сопутствующих газов : в 2 т. / Б.А. Григорьев, А.А. Герасимов, И.С. Александров; под общ. ред. Б.А. Григорьева. — М.: Издательский дом МЭИ, 2019. Т. 2. — 484 с.: ил.

ISBN 978-5-383-01322-9

ISBN 978-5-383-01324-3 (т. 2)

Рассматриваются методы экспериментального и расчетно-теоретического исследования теплофизических свойств углеводородов в широкой области параметров состояния.

Книга издана в двух томах. Том 1 посвящен исследованиям термодинамических свойств углеводородов нефти и природного газа. В т. 2 приводятся методы экспериментального исследования вязкости и теплопроводности углеводородов, подробное описание экспериментальных установок, методики измерений и оценки погрешностей, а также представляются результаты экспериментального исследования указанных свойств для углеводородов, входящих в состав нефти, газовых конденсатов и природного газа. Рассматриваются современные теоретические, полуэмпирические и эмпирические методы расчета вязкости и теплопроводности, методы разработки интерполяционных уравнений указанных свойств в широких диапазонах параметров состояния. Приводятся интерполяционные уравнения для расчета вязкости и теплопроводности углеводородов и газов. Полученные по предлагаемым уравнениям и методам значения коэффициентов переноса сравниваются с наиболее надежными экспериментальными авторскими и литературными данными.

Книга предназначена для научных работников, инженеров, преподавателей вузов, аспирантов и студентов, занимающихся изучением теплофизических свойств, а также специалистов, использующих их при проектировании разработки и освоении нефтегазовых месторождений, в расчетах процессов теплообмена в химических технологиях и при транспортировке углеводородного сырья.

УДК 665.6:536
ББК 22.317

ISBN 978-5-383-01324-3 (т. 2) © Григорьев Б.А., Герасимов А.А., Александров И.С., 2019
ISBN 978-5-383-01322-9 © АО «Издательский дом МЭИ», 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Глава 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ УГЛЕВОДОРОДОВ.....	9
1.1. Установка для измерения вязкости углеводородов при атмосферном давлении	11
1.2. Экспериментальная установка для исследования вязкости жидких углеводородов при давлении до 60 МПа	14
1.2.1. Описание экспериментальной установки.....	14
1.2.2. Заполнение установки исследуемой жидкостью	19
1.2.3. Создание и измерение давления	20
1.2.4. Достижение, измерение и регулирование температуры	21
1.2.5. Измерение времени течения исследуемого вещества	21
1.2.6. Расчетные уравнения для вычисления динамической вязкости.....	22
1.2.7. Основные геометрические постоянные вискозиметра	23
1.2.8. Оценка погрешностей измерения вязкости	27
1.3. Экспериментальная установка для измерения вязкости углеводородов в жидкой и газовой фазах.....	33
1.3.1. Описание экспериментальной установки и методики измерений.....	33
1.3.2. О неустановившемся течении газа в капиллярном вискозиметре с учетом эффекта скольжения	36
1.4. Установка для исследования динамической вязкости жидкостей и газов методом протока вещества через капилляр при постоянном перепаде давления	40
1.4.1. Описание экспериментальной установки и ее отдельных элементов.....	41
1.4.2. Капилляры	53
1.4.3. Методика измерения и расчета вязкости.....	54
1.4.4. Погрешности измерения	59
1.4.5. Измерение вязкости воды	63
1.5. Результаты экспериментального исследования вязкости углеводородов	67
1.5.1. Результаты исследования и первичный анализ экспериментальных данных	67
1.5.2. Полуэмпирические уравнения вязкости	77
1.6. Выводы и рекомендации	80
Список литературы	80

Глава 2. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВЯЗКОСТИ ПРИРОДНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ И СОПУТСТВУЮЩИХ ГАЗОВ	85
2.1. Вязкость в состоянии разреженного газа	85
2.1.1. Теоретические методы	85
2.1.2. Полуэмпирические методы	95
2.1.3. Эмпирические методы	96
2.2. Методы расчета вязкости в широких диапазонах параметров состояния	100
2.2.1. Теоретические методы	100
2.2.2. Полуэмпирические методы	101
2.2.3. Эмпирические методы описания и расчета вязкости в широких диапазонах температуры и давления	117
2.3. Вязкость в критической области	126
2.4. Корреляционные уравнения вязкости для природных углеводородов и сопутствующих газов	130
2.4.1. Формы корреляционных уравнений	130
2.4.2. Уравнения вязкости для углеводородных и сопутствующих газов, воды	132
2.4.3. Уравнения вязкости для жидких алканов	145
2.4.4. Уравнения вязкости для циклоалканов	154
2.4.5. Уравнения вязкости для ароматических углеводородов	155
2.5. Выводы и рекомендации	162
<i>Список литературы</i>	163
Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ УГЛЕВОДОРОДОВ	177
3.1. Стационарный метод нагретой проволоки	178
3.1.1. Измерительная ячейка	178
3.1.2. Система термостатирования	189
3.1.3. Система создания повышенных давлений	190
3.1.4. Система заполнения установки исследуемой жидкостью	191
3.1.5. Система электрических измерений	191
3.1.6. Методика получения и обработки первичных опытных данных	193
3.1.7. Влияние радиационного теплопереноса	204
3.1.8. Оценка погрешности измерений теплопроводности методом нагретой проволоки	213
3.1.9. Проверка работы установок на веществах с известной теплопроводностью	215
3.2. Стационарный метод коаксиальных цилиндров	217
3.2.1. Сравнительные характеристики измерительных ячеек различной конструкции	217
3.2.2. Экспериментальная установка с измерительной ячейкой с торцами, работающими по плоскому слою	224

3.2.3. Методика проведения эксперимента	228
3.2.4. Основное расчетное уравнение для определения теплопроводности и методика введения поправок	228
3.2.5. Оценка погрешности измерений теплопроводности методом коаксиальных цилиндров	239
3.2.6. Проверка экспериментальной установки	242
3.3. Метод коаксиальных цилиндров в режиме монотонного разогрева	244
3.3.1. Теоретические основы метода монотонного разогрева	244
3.3.2. Описание конструкции экспериментальной установки	249
3.3.3. Градуировка установки в относительном варианте	253
3.3.4. Оценка погрешности измерений теплопроводности	256
3.4. Результаты экспериментальных исследований теплопроводности углеводородов	261
3.4.1. Результаты исследования и первичный анализ экспериментальных данных	261
3.4.2. Изменение теплопроводности в гомологических рядах углеводородов нефти в зависимости от их физико-химических свойств	270
3.4.3. Проверка методов расчета теплопроводности жидких углеводородов	281
3.4.4. Влияние давления на теплопроводность углеводородов	305
3.4.5. Аддитивно-групповой метод расчета теплопроводности углеводородов	318
3.5. Выводы и рекомендации	327
<i>Список литературы</i>	329

Глава 4. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИРОДНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ И СОПУТСТВУЮЩИХ ГАЗОВ	343
4.1. Теплопроводность веществ в состоянии разреженного газа	343
4.1.1. Теоретические и полуэмпирические методы	344
4.1.2. Эмпирические методы	350
4.2. Методы расчета теплопроводности в широких диапазонах параметров состояния	352
4.2.1. Подход Ассаля и Даймонда	353
4.2.2. Модифицированный подход Энскога	354
4.2.3. Теория Райнуотера—Френда для теплопроводности	356
4.2.4. Расширенный принцип соответственных состояний	360
4.3. Теплопроводность в критической области	361
4.3.1. Приближение Олхови—Зенгерса	363
4.3.2. Приближение Киселева—Куликова	365
4.3.3. Приближение Феррелла	366
4.4. Корреляционные уравнения теплопроводности природных углеводородов и сопутствующих газов	369
4.4.1. Углеводородные и сопутствующие газы	369
4.4.2. Жидкие алканы	383

4.4.3. Нафтеновые углеводороды.....	390
4.4.4. Ароматические углеводороды.....	392
4.5. Выводы и рекомендации	398
<i>Список литературы</i>	399
Приложение 1. Экспериментальные данные о динамической вязкости	407
Приложение 2. Экспериментальные данные о теплопроводности углеводородов	430